光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2022102201

紧凑型纳米薄膜铌酸锂复合波导光电子可逆逻辑门

陈 直*

（上海电子信息职业技术学院 通信与信息工程学院，上海 201411）

摘 要： 基于纳米薄膜铌酸锂与氮化硅复合波导结构，构建了光电子可逆逻辑门，应用于神经形态光子学和量子计算。该光电子可逆逻辑门的主体由两个马赫-曾德尔调制器级联而成，结构紧凑，全长仅为 4.4 mm，是普通质子交换铌酸锂调制器长度的百分之一。工作在 1.55 μm 波长时，该马赫-曾德尔调制器仅需 4.9 V 电压就可以实现一次完整的功率交换，很好地与 CMOS 工艺相兼容。器件特性研究表明，该光电子可逆逻辑门能够实现可逆逻辑运算功能。此外，该器件在 1.4～1.6 μm 波长范围内，插入损耗均值为 0.6 dB，输出端口的最小串扰为－47 dB，消光比的最大值为 41 dB；在 4～6 V 电压范围内，插入损耗均值为 0.63 dB，输出端口的最小串扰为－26 dB，消光比的最大值为 22 dB，显示出了良好的响应特性。

关键词： 纳米薄膜铌酸锂；铌酸锂-氮化硅复合波导；马赫-曾德尔调制器；可逆逻辑运算

中图分类号： TN256 **文章编号：** 1001－5868(2023)01－0032－07

Compact Photoelectronic Reversible Logic Gate Based on Nano-film Lithium Niobate Hybrid Waveguide

CHEN Zhi

（Shanghai Technical Institute of Electronics Information，Shanghai 201411，CHN）

Abstract： A photoelectronic reversible logic gate applied to neuromorphic photonics and quantum computation was constructed with a hybrid nano-thin film lithium niobate and silicon nitride waveguide. The main structure of the photoelectronic reversible logic gate was composed of two cascaded Mach-Zehnder modulators. The total length of the gate was only 4.4 mm，being only one hundredth of the length of a common proton exchange lithium niobate modulator. Operating at the wavelength of 1.55 μm，the Mach-Zehnder modulator achieved a complete power exchange with only 4.9 V voltage that was well compatible with CMOS process. The device characteristics show that the photoelectronic reversible logic gate can realize reversible logic operation. Moreover，in the wavelength range of 1.4 μm to 1.6 μm，the mean insertion loss of the device is 0.6 dB，the minimum cross-talk of the output port is －47 dB，and the maximum extinction ratio is 41 dB. In the voltage range of 4 V to 6 V，the mean insertion loss is 0.63 dB，the minimum cross-talk of the output port is －26 dB，and the maximum extinction ratio is 22 dB. Those performances guarantee the effectiveness of the photoelectronic reversible logic gate.

Key words： nano thin-film lithium niobate；hybrid lithium niobate and silicon nitride waveguide；Mach-Zehnder modulator；reversible logic operation

收稿日期：2022－10－22.

* **通信作者：**陈 直 **E-mail：** chenzhi@stiei.edu.cn

0　引言

近年来，随着神经形态光子学[1]和量子计算[2]的蓬勃发展，以光电子集成为基础的片上光学计算引起了广泛关注，在解决集成数字电路面临的“电子瓶颈”方面被寄予厚望[3]。神经形态光子学是未来承载超快人工智能神经网络的载体，在智能医疗诊断、超高速通信、高性能科学计算等领域有着重要的应用前景[4-6]。此外，量子计算，作为未来实现量子计算机和量子加密通信的核心技术，其重要性不言而喻[7]。这两种新兴的光子技术都需要大规模密集光电子元器件集成，集成化与小型化是其能否走向实用化的关键性前提。因此，作为基本运算单元的集成光电子逻辑器件备受关注。相关研究主要集中于如何实现各类基本逻辑单元，例如：光电子与、或、非门，以及光学全加器等[8-11]。其实现方法主要有半导体光放大器（SOA）、微环谐振腔、太赫兹光学非对称复用器（TOAD）、非线性光学环形镜（NOLM）和光纤等[12-19]。基于以上方法实现的光电子逻辑单元在性能方面均可以较好地实现目标逻辑功能，完成相应的逻辑运算。然而，在过去的十几年时间里，虽然这些技术在构建与、或、非等经典布尔代数逻辑门方面进步明显，但是每种技术仍存在尚需解决的问题。例如：SOA 需要高驱动电流，并且存在增益饱和问题；微环谐振腔的环长有限，影响它的串扰和开关速度；NOLM 的性能非常依赖光强，并且缺乏紧凑性和稳定性。除了上述亟需改善的问题以外，基于这些技术的器件只能以分立形式搭建而成，导致了器件的整体体积较大，不够紧凑。

另一方面，电子传输速率较慢的固有缺陷，从本质上决定了单纯的电子信息处理系统只能依靠增加晶体管密度的方式改善处理速度，为高能耗埋下了隐患。摩尔定律指出，芯片上可以容纳的晶体管数量大约每隔 18 个月就会翻一翻。晶体管数量的增加在一定程度上改善了处理器的性能，但同时也带来了更多的热量损耗，引起能量浪费。有统计表明，每增加一个信息比特，其对应的热量损耗就增加 $kT\ln 2$，其中 k 为玻尔兹曼常数，T 为绝对温度[20]。对于一个信息处理系统而言，信息比特损失得越多，其能量损耗就越大。目前，有效的解决方法来源于对基本逻辑门的重构和信息传输媒质的转变。现代数字信息处理系统的计算原理是基于经典的布尔代数运算规则，具有不可逆性，无法从输出推断输入。其原因在于系统中存在大量输入比特的丢失和浪费，由此也引起了大量不必要的能量损耗。可逆逻辑通过数量相等的输入与输出形成双向点对点映射，有效地利用了每一个输入比特，最大限度地降低了能耗[21]。光学可逆逻辑门不仅可以解决由于信息比特损失而引起的能耗问题，还利用光学信号替换电子信号以克服“电子瓶颈”。

由于绝缘衬底上硅（SOI）技术缺少足够的调制深度，其调控器件的形成需要借助其他材料的帮助[22]。近年来出现的纳米薄膜铌酸锂技术有效地解决了质子交换铌酸锂折射率差较小的弊端，极大地提升了铌酸锂电光开关的紧凑性，为其大规模集成奠定了坚实的基础[23]。然而，铌酸锂条形波导的制备技术尚不成熟，只能与其他材料混合集成，从而实现功能性[24-25]。目前，两种混合集成技术备受关注。一种是利用纵向耦合技术实现铌酸锂脊型波导与其他材料条形波导之间的能量交换[26]；另一种是利用与铌酸锂折射率差接近的材料共同构成复合脊型波导结构[27]。前一种受制于铌酸锂薄膜的刻蚀深宽比，纵向耦合效率往往较低；后一种避免了铌酸锂刻蚀深宽比的影响，耦合效率较高，适用于片上光学计算的承载平台。

为了发展新型光子器件以解决现有电子芯片系统存在的“电子瓶颈”等问题，本文构建了一种紧凑型纳米薄膜铌酸锂混合集成光电子可逆逻辑门。该可逆逻辑门位于二氧化硅衬底上，由铌酸锂薄膜与氮化硅条形波导共同构成级联改进型马赫-曾德尔结构。使该马赫-曾德尔结构在电压调控下恰当地实现功率分配，从而形成输入电压信号与输出光信号之间的特定逻辑关系。实验表明，该器件不仅具备良好的可逆逻辑运算功能，还具有紧凑的结构、较小的输入电压、较低的插入损耗、较高的消光比、较小的信号串扰等优良性能。

1　器件结构与工作原理

传统的数字逻辑运算是以经典的布尔代数为基础，具有典型的多输入-单输出特征，表现出明显的不可逆性，只能从输入推断输出，不能从输出推断输入。从信息传输平衡的角度讲，这样的单向逻辑运算必然造成能量损失，引起大量的热耗散。可逆逻辑通过具有相同数量的输入和输出来解决这个问题，为超低功耗数字逻辑计算提供了可行的解决方案。2×2 可逆逻辑门如图 1 所示，它具有两个输入

端口和两个输出端口。两个输出端口能够分别完成逻辑“是”运算和逻辑“异或”运算，从而构成量子计算中所需的基础量子逻辑门——可控非门，其输入与输出之间的具体逻辑关系为 $O_1=I_1$，$O_2=I_1\oplus I_2$，详见其真值表 1。



图 1 2×2 可逆逻辑门示意图

表 1 2×2 可逆逻辑门的真值表

Input		Output	
I_1	I_2	O_1	O_2
0	0	0	0
0	1	0	1
1	0	1	1
1	1	1	0

不同于经典的“与”、“或”、“非”等布尔逻辑门，可控非门要求器件具有物理上的可控性。马赫-曾德尔调制器作为一种常见的集成光学器件，具备良好的调控性。基于马赫-曾德尔调制器的可逆逻辑门如图 2 所示。这种级联改进型马赫-曾德尔结构以电信号为输入，光信号为输出，构建得到电光可逆逻辑门。其中，E 为使能端口，负责控制器件是否工作；I_1 与 I_2 为输入端口；O_1 与 O_2 为输出端口。定义有电压加载于电极时，I_1 与 I_2 为“1”，否则为“0”；有光出射且其功率大于等于阈值时，O_1 与 O_2 为“1”，否则为“0”。入射光的传播路径受控于电信号，当第一级马赫-曾德尔开关的电压为零时，入射光完成交叉耦合后进入第二级马赫-曾德尔开关；如果第二级马赫-曾德尔开关的电压为零，那么入射光再完成一次交叉耦合后出射。依此原理，凭借电信号的控制，该级联改进型马赫-曾德尔结构能够实现可逆逻辑功能。

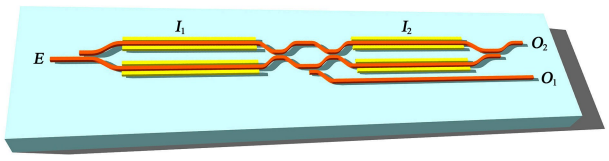


图 2 基于马赫-曾德尔调制器的可逆逻辑光波回路

2 器件的功率分配

级联型马赫-曾德尔结构主要依靠铌酸锂的电光调相作用控制输出端口的功率分配，从而实现逻辑功能。因此，该结构的输出端口功率分配受控于输入电压引起的相位差，表示为

$$P_1=1-\cos^2\left(\frac{\Delta\phi_1}{2}\right) \tag{1}$$

$$P_2=\frac{1}{4}\left[\sin\left(\frac{\Delta\phi_1+\Delta\phi_2}{2}\right)+\sin\left(\frac{\Delta\phi_1-\Delta\phi_2}{2}\right)\right]^2+\frac{1}{4}\left[\sin\left(\frac{\Delta\phi_1+\Delta\phi_2}{2}\right)-\sin\left(\frac{\Delta\phi_1-\Delta\phi_2}{2}\right)\right]^2 \tag{2}$$

式中，$\Delta\phi_1$ 和 $\Delta\phi_2$ 分别为第一级马赫-曾德尔调制器和第二级马赫-曾德尔调制器产生的相位差，P_1 与 P_2 分别为输出端口 O_1 与 O_2 的归一化功率。对于只具有两个逻辑状态的逻辑门器件，其逻辑值可以依据功率的阈值规定。理想情况下，P_1 与 P_2 都能够通过相应的相位变化得到 0 和 1。这种相位变化，也就是 $\Delta\phi_1$ 或者 $\Delta\phi_2$ 都是由马赫-曾德尔调制器的调制产生，可以写成

$$\Delta\phi=\frac{2\pi}{\lambda}\Delta nL \tag{3}$$

式中，λ 是工作波长，L 是电极的长度，Δn 是由于电光效应引起的折射率变化，可以表示为

$$\Delta n=\frac{1}{2}n^3rE \tag{4}$$

式中，n 是材料的折射率，r 是材料的电光系数，E 是所加电压引起的电场强度。马赫-曾德尔调制器的光功率完全耦合要求上下两臂之间的光相位产生 π 的相位差，也就是 $\Delta\phi$ 为 π，对应的电压为 V_π。联合式(3)和(4)可以得到

$$V_\pi=\frac{\lambda d}{n^3rL} \tag{5}$$

式中，d 是电极的间距。由此，应用式(1)～(5)构成的数学公式体系可以计算得到可逆逻辑门的输出功率，如图 3 所示。

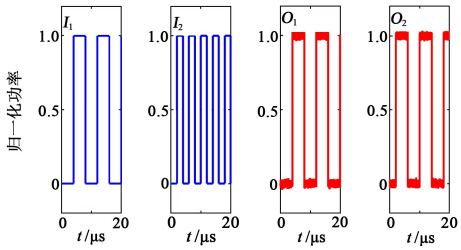


图 3 可逆逻辑门的逻辑功能(输入状态分别为“00”，“01”，“10”和“11”)

3 器件的功能验证与性能分析

器件横截面的折射率分布如图 4 所示。在二氧化硅衬底上形成 400 nm 厚的铌酸锂薄膜，再制作

500 nm 厚的氮化硅薄膜，并刻蚀形成 1 μm 宽的氮化硅条形波导。在氮化硅条形波导左右镀有一对金属电极，形成上下两个通道的推挽式电极结构，从而减小马赫-曾德尔调制器的干涉臂长度。由于铌酸锂与氮化硅之间的折射率差较小，二者构成的复合波导为脊型波导，其单模光场如图 5 所示。光场的绝大多数能量被局限在铌酸锂薄膜内，少部分能量位于氮化硅波导内。两种材料形成的几何约束共同形成了一个比较完好的脊形波导，确保了光场的单模传输。

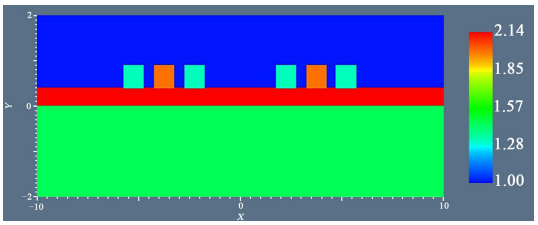


图 4　器件横截面的折射率分布

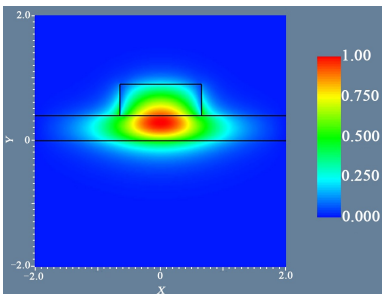
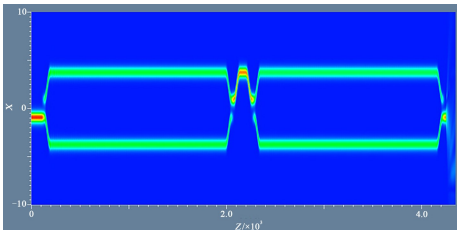
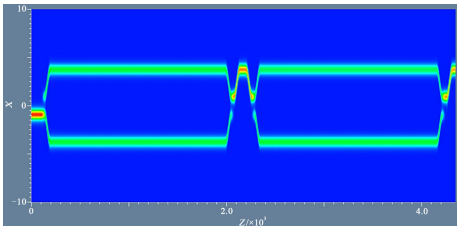


图 5　铌酸锂-氮化硅复合波导单模光场

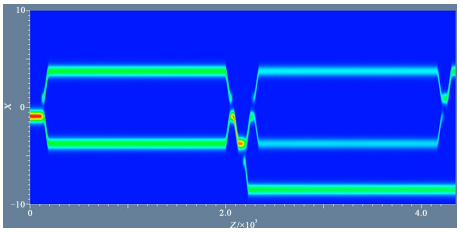
器件全长 4.4 mm，工作波长为 1.55 μm，工作电压为 4.9 V，包含两个完全相同的马赫-曾德尔调制器，实现无电压信号时完全交叉耦合，有电压信号时完全平行耦合。该可逆逻辑门的逻辑功能如图 6 所示。当两个马赫-曾德尔调制器都没有电压信号，也就是 I_1 与 I_2 均为“0”时，从使能端口 E 入射的光信号经由第一个马赫-曾德尔调制器完成交叉耦合，从其上端输出端口输出并进入第二个马赫-曾德尔调制器，再经由第二个马赫-曾德尔调制器完成交叉耦合，从下端输出端口出射，此时定义的可逆逻辑门的两个输出端口均无光信号，也就是 O_1 和 O_2 均为“0”，如图 6(a)所示；当第一个马赫-曾德尔调制器没有电压信号，第二个马赫-曾德尔调制器加有电压信号，也就是 I_1 为“0”，I_2 为“1”时，从使能端口 E 入射的光信号经由第一个马赫-曾德尔调制器完成交叉耦合，从其上端输出端口输出并进入第二个马赫-曾德尔调制器，再经由第二个马赫-曾德尔调制器完成平行耦合，从上端输出端口出射，此时定义的可逆逻辑门的两个输出端口之一有光信号，也就是 O_1 为“0”，O_2 为“1”，如图 6(b)所示；当第一个马赫-曾德尔调制器加有电压信号，第二个马赫-曾德尔调制器没有电压信号，也就是 I_1 为“1”，I_2 为“0”时，从使能端口 E 入射的光信号经由第一个马赫-曾德尔调制器完成平行耦合，从其下端输出端口输出并被一个定向耦合器分为两路，一路直达端口 O_1，另一路进入第二个马赫-曾德尔调制器，再经由第二个马赫-曾德尔调制器完成交叉耦合，从上端输出端口出射，此时定义的可逆逻辑门的两个输出端口都有光信号，也就是 O_1 和 O_2 均为“1”，如图 6(c)所示；当两个马赫-曾德尔调制器都加有电压信号，也就是 I_1 和 I_2 均为“1”时，从使能端口 E 入射的光信号经由第一个马赫-曾德尔调制器完成平行耦合，从其下端输出端口输出并被一个定向耦合器分为两路，一路直达端口 O_1，另一路进入第二个马赫-曾德尔调制器，再经由第二个马赫-曾德尔调制器完成平行耦合，从下端输出端口出射，此时定义的可逆逻辑门的两个输出端口之一有光信号，也就是 O_1 为“1”，O_2 为“0”，如图 6(d)所示。需要强调的是，图 6(a)和 6(d)中第二个马赫-曾德尔调制器的下方输出端口出现的散射是光波在氮化硅与空气界面处传播时自然形成，归因于器件的结构设计，如图 2 所



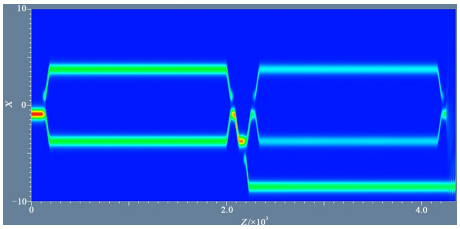
(a)



(b)



(c)



(d)

图 6 器件的功能验证结果

示。该端口在实际的器件中会被吸收封挡，避免杂散光产生而影响器件性能的不良耦合。

为了验证器件的性能，对器件的光谱响应特性与电压响应特性开展了研究。作为衡量器件功率利用效率的重要参数，插入损耗(Insertion Loss，IL)写为

$$IL = 10\log(P_{out}/P_{in}) \tag{6}$$

式中，P_{out} 是器件输出总功率，P_{in} 是器件输入总功率。在 1.4～1.6 μm 波长范围内，器件的插入损耗绝对值均小于 0.7 dB，最小值为 0.59 dB，且由于波长变大对导模的挤压向外辐射作用，使得插入损耗的绝对值随波长有单调递增的趋势，如图 7(a)所示。波长的变化必然影响器件的功率分配，导致输出端口之间的串扰发生变化。串扰(Crosstalk，CT)表达式为

$$CT = 10\log(P_2/P_1) \tag{7}$$

式中，P_2 是从端口 O_2 输出的功率，P_1 是从端口 O_1 输出的功率。在两个马赫-曾德尔调制器上加电压，理想情况下有 50%的功率从 O_1 输出，O_2 输出的功率为 0，也就是 P_1 为 0.5，P_2 为 0，此时串扰的理想值为无穷小。从图 7(b)可以看出，在设计波长 1.55 μm 左右，器件的输出端口串扰为－47 dB，是在 1.4～1.6 μm 波长范围内取得的极小值。出现极小值的主要原因是偏离设计波长 1.55 μm 的光波在 O_2 输出的功率不为 0。从整体上看，在 1.4～1.6 μm 的 200 nm 带宽内的端口串扰均小于－18 dB，性能比较理想。此外，消光比(Extinction Ratio，ER)作为衡量输出端口性能的重要指标，可表达为

$$ER_i = 10\log(P_{i\max}/P_{i\min}) \tag{8}$$

式中，$P_{i\max}$ 表示第 i 个输出端口的能够得到的最大功率，$P_{i\min}$ 表示第 i 个输出端口的能够得到的最小功率。为了尽可能排除干扰因素，选取输出端口 O_1 和 O_2 的逻辑状态为“11”和“00”时对应的功率分别计算 ER_1 和 ER_2。在 1.4～1.6 μm 波长范围内，O_1 和 O_2 两个端口的消光比都大于 12 dB，并且都在设计波长 1.55 μm 左右出现极大值 41 dB，展现出了良好的消光性能，如图 7(c)和 7(d)所示。

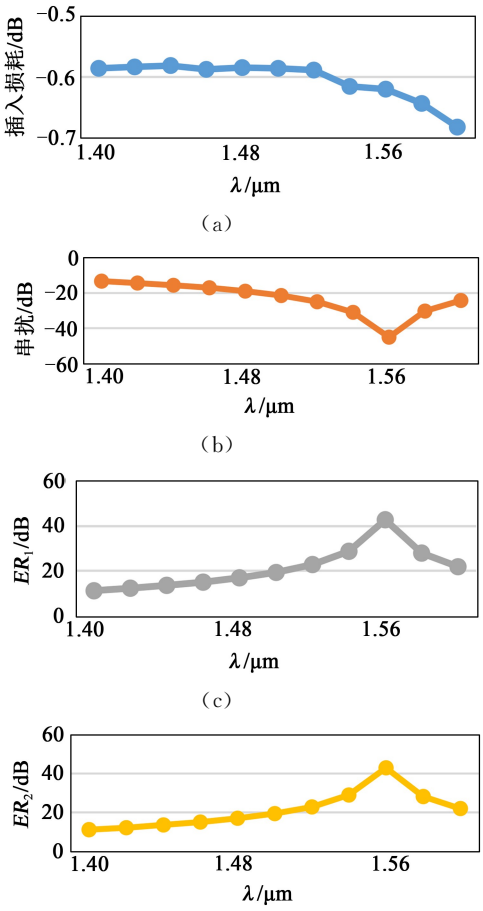


图 7 器件的光谱响应特性

5 V 电压是 CMOS 工艺的一个标准，因此把器件的驱动信号电压控制在 5 V 以内是电光调制器的内在要求。图 8 描述了器件在 4～6 V 电压范围内的响应特性。器件的插入损耗绝对值均小于 0.65 dB，其在电压为 5.2 V 左右出现极小值 0.625 dB，说明电压偏离 5.2 V 时，导模发生了一些变化，导致向外辐射的光场增大。然而，从整体上看，插入损耗的绝对值在 0.625～0.65 dB，达到了光电子器件的基本要求，如图 8(a)所示。作为逻辑器件，被电压驱动后的端口串扰要稳定地处于较低水平。在 4.8～5.4 V 电压范围内，器件的输出端口之间的串扰小于－14 dB，5 V 时出现极小值－26 dB，显示出了良好的信号独立性与抗干扰能力。此外，器件的消光比随电压的变化而变化，在电压为 5 V 左右出现极大值 22 dB。在 4.8～5.4 V 电压范围内，器件在两个输出端口的消光比均大于 10 dB，具有良好的消光特性。

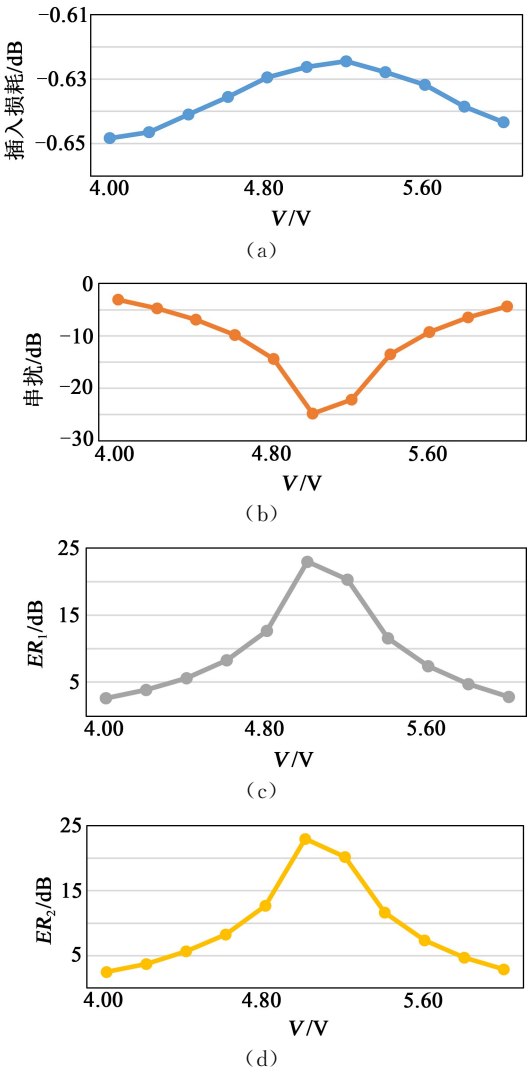


图 8　器件的电压响应特性

4　结论

基于纳米薄膜铌酸锂与氮化硅复合波导结构，构建了光电子可逆逻辑门，以期作为逻辑运算单元在神经形态光子学和量子计算中发挥作用。该光电子可逆逻辑门的主体部分为采用了推挽电极的级联型马赫-曾德尔调制器。由于纳米薄膜铌酸锂复合波导比质子交换铌酸锂更易获取较大的折射率差，使得马赫-曾德尔调制器的尺寸被极大地缩减。包含两个马赫-曾德尔调制器的光电子可逆逻辑门总长为 4.4 mm，工作在 1.55 μm 波长时，仅需 4.9 V 电压就可以完成一次 2π 相位翻转，使得一个马赫-曾德尔调制器实现一次完整的功率交换。单个纳米薄膜铌酸锂马赫-曾德尔调制器的长度仅为 2.2 mm，是质子交换铌酸锂马赫-曾德尔调制器长度的百分之一，且驱动电压仅为 4.9 V，很好地与 CMOS 工艺相兼容。器件特性研究表明，该光电子可逆逻辑门能够实现四种逻辑状态，完全符合可逆逻辑真值表的要求。此外，器件的光谱响应研究表明，在 1.4～1.6 μm 波长范围内，插入损耗均值为 0.6 dB，输出端口的最小串扰为 −47 dB，消光比的最大值为 41 dB，表现出了良好的光谱特性；器件的电压响应研究表明，在 4～6 V 电压范围内，插入损耗均值为 0.63 dB，输出端口的最小串扰为 −26 dB，消光比的最大值为 22 dB，显示出了良好的电压特性。

参考文献：

[1] Shastri B J, Tait A N, De Lima T F, et al. Photonics for artificial intelligence and neuromorphic computing[J]. Nature Photonics, 2021, 15(2): 102-114.

[2] Paesani S, Ding Y, Santagati R, et al. Generation and sampling of quantum states of light in a silicon chip[J]. Nature Physics, 2019, 15(9): 925-929.

[3] Elshaari A W, Pernice W, Srinivasan K, et al. Hybrid integrated quantum photonic circuits[J]. Nature Photonics, 2020, 14(5): 285-298.

[4] Wetzstein G, Ozcan A, Gigan S, et al. Inference in artificial intelligence with deep optics and photonics[J]. Nature, 2020, 588(7836): 39-47.

[5] 陈　直. 布拉格光栅结构 RGB 波导复用/解复用器的光学特性[J]. 半导体光电, 2021, 42(6): 789-794.
Chen Zhi. Optical properties of RGB waveguide multiplexers/demultiplexers with Bragg grating structure[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2021, 42(6): 789-794.

[6] Sui G, Liu F, Guo Y, et al. Flexible broadband white light multimode interference coupler[J]. Opt. Express, 2021, 29(19): 29730.

[7] Paraiso T K, Roger T, Marangon D G, et al. A photonic integrated quantum secure communication system[J]. Nature Photonics, 2021, 15(11): 850-856.

[8] 徐光跃, 陈　莹, 李培丽. 基于二维光子晶体的三输入全光逻辑与门[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 331-335.
Xu Guangyue, Chen Ying, Li Peili. Three-input all-optical AND gate based on two-dimensional photonic crystal[J]. Chinese J. of Lasers, 2020, 47(10): 331-335.

[9] Chen Z, Wang G D, Wang X. Physical mechanism and response characteristics of unsaturated optical stopping based amorphous arsenic sulfide thin-film waveguides[J]. IEEE Photonics J., 2019, 11(1): 6100910.

[10] Chen Z, Wang G D, Wang X, et al. Moving toward optoelectronic logic circuits for visible light: a chalcogenide glass single-mode single-polarization optical waveguide switch[J]. Appl. Opt., 2017, 56(5): 1405-1412.

[11] 胡永倩, 王海龙, 张书玉, 等. 全光逻辑异或门相位差特性研究[J]. 激光技术, 2018, 42(5): 659-665.

Hu Y Q, Wang H L, Zhang S Y, et al. Study on phase difference of all-optical logic XOR gates[J]. Laser Technol., 2018, 42(5): 659-665.

[12] Mandal D, Mandal S, Garai S K. Alternative approach of developing all-optical Fredkin and Toffoli gates[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 72: 33-41.

[13] Chattopadhyay T. All-optical modified Fredkin gate [J]. IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron., 2012, 18: 585-592.

[14] Maity G K, Roy J N, Maity S P. Mach-Zehnder interferometer based all-optical Peres gate [C]// Adv. in Computing and Communications (ACC), 2011, Communications in Computer and Information Science, 2011: 192.

[15] Taraphdar C, Chattopadhyay T, Roy J N. Mach-Zehnder interferometer-based all-optical reversible logic gate [J]. Optics & Laser Technol., 2015, 72: 33-41.

[16] Lala P K, Parkerson J P, Chakraborty P. Adder designs using reversible logic gates[J]. WSEAS Trans. on Circuits and Systems, 2010, 9(4/6): 369-378.

[17] Bordoloi K, Theresal T, Prince S. Design of all optical reversible logic gates [C]// 2014 Inter. Conf. on Communications and Signal Processing (ICCSP), 2014: 1583-1588.

[18] Kostinski N, Fok M P, Prucnal P R. Experimental demonstration of an all-optical fiber-based Fredkin gate[J]. Opt. Lett., 2009, 34(18): 2766-2768.

[19] Kotiyal S, Thapliyal H, Ranganathan N. Mach-Zehnder interferometer based all optical reversible NOR gates[C]// 2012 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI, 2012: 209-212.

[20] Landauer R. Irreversibility and heat generation in the computing process [J]. IBM J. Res. Dev., 1961, 5: 183-191.

[21] Bennett C. Logical reversibility of computation[J]. IBM J. Res. Dev., 1973, 17: 525-532.

[22] Yu L, Yin Y, Shi Y, et al. Thermally tunable silicon photonic microdisk resonator with transparent graphene nanoheaters[J]. Optica, 2016, 3: 159-166.

[23] Wang C, Zhang M, Chen X, et al. Integrated lithium niobate electro-optic modulators operating at CMOS-compatible voltages[J]. Nature, 2018, 562: 101-104.

[24] Sun D, Zhang Y, Wang D, et al. Microstructure and domain engineering of lithium niobate crystal films for integrated photonic applications[J]. Light Sci. Appl., 2020, 9: 197.

[25] 陈 直, 陈抱雪, 隋国荣, 等. $LiNbO_3$ 基 Sn-As_2S_8 单偏振单模波导电光开关的设计[J]. 光学仪器, 2009, 31(3): 66-69.

Chen Zhi, Chen Baoxue, Sui Guorong, et al. Design of $LiNbO_3$-based Sn-As_2S_8 polarization-independence and single-mode waveguide electrical-optical switches [J]. Optical Instruments, 2009, 31(3): 66-69.

[26] He M, Xu M, Ren Y, et al. High-performance hybrid silicon and lithium niobate Mach-Zehnder modulators for 100 Gbit·s^{-1} and beyond[J]. Nature Photonics, 2019, 13: 359-364.

[27] Rao A, Patil A, Rabiei P et al. High-performance and linear thin-film lithium niobate Mach-Zehnder modulators on silicon up to 50 GHz[J]. Opt. Lett., 2016, 41(24): 5700-5703.

作者简介:

陈 直(1982—),男,吉林省梨树县人,博士,助理研究员,2015年博士毕业于中国科学院上海应用物理研究所,2015～2018年于中国科学院上海微系统与信息技术研究所从事博士后研究,主要研究方向为光波导与集成光学。